

p.1500

3-1 DICOM PS3.14 GSDF

As mentioned in Section 1-1, DICOM PS3.14 was issued in 1998 to ensure consistency of image data display, by regulating a GSDF.

A minimum difference in luminance of a given target which can be noticed by an average human observer under a given observation condition is defined as 1 JND (Just Noticeable Difference). A GSDF is a JND that is plotted up to 1023 steps when a minimum luminance is 0.05cd/m² (Fig. 4). JND INDEX indicates an input value for a display apparatus. A mathematical expression is provided to be incorporated in equipment (Table 5).

Using this function, a JND can be calculated from a maximum luminance and a minimum luminance, to find the number of gradation steps that can be recognized by man. At this time, care should be taken to the fact that a luminance thus obtained includes influence of surrounding light. For example, the luminance of a film/shaucasten calculated in Section 1-1 is as follows, using Expression (2) in Table 5.

$$JND = JND_{max} \cdot JND_{min} = j(L_{mas}) - j(L_{min}) = j(1893.9) - j(4.0) = 908.2 - 145.7 = 762.5$$

Assuming a monitor with $L_{min} = 1.0 \text{cd/m}^2$ and $L_{mas} = 400 \text{cd/m}^2$, there holds the expression,

$$JND = 672.8 \cdot 71.5 = 601.3.$$

Under the above condition, the expression indicates that the value of theoretically recognizable steps of luminance is 762 in the case of a film/shaucasten*, and 601 in the case of a monitor.

3-2 Application to a monitor

A procedure for applying a GSDF to a monitor will be described below.

- (1) Determine L_{min} and L_{max} , in consideration of surrounding light.
- (2) Calculate JND_{max} and JND_{min} from L_{mas} and L_{min} , using Expression (2) in Table 5.
- (3) When each input level is specified by value P, JND is divided into $2^n - 1$ to be allocated to the resolution (n bit) of a digital input signal. The luminance L of with respect to each value P is calculated as follows using Expression (1) in Table 5.

$$L = L(JND_{min} + JND \cdot P / (2^n - 1)), \quad JND = JND_{max} - JND_{min}.$$

When an input is 8 bit in the monitor described in Section 3-1,

$$\begin{aligned} L &= L(71.5 + 601.3 \cdot P / 255) \\ &= L(71.5 + 2.358 \cdot P), \quad P = 0, 1, \dots, 255 \end{aligned}$$

The luminance is given in 2.358 JND steps, in the range of 1 cd/m² to 400cd/m² (Fig. 4).

In the case of a film, conversion to a higher density value is required.

Fig. 5 shows, as a reference, comparison of various gradation characteristics when

$L_{min}=1.0\text{cd/m}^2$ and $L_{max}=400\text{cd/m}^2$. Basically, $\gamma=2.2$ is a characteristic of a CRT, and Loglinear is a characteristic of a film. In general, LCD is also set to exhibit a characteristic of $\gamma=2.2$.

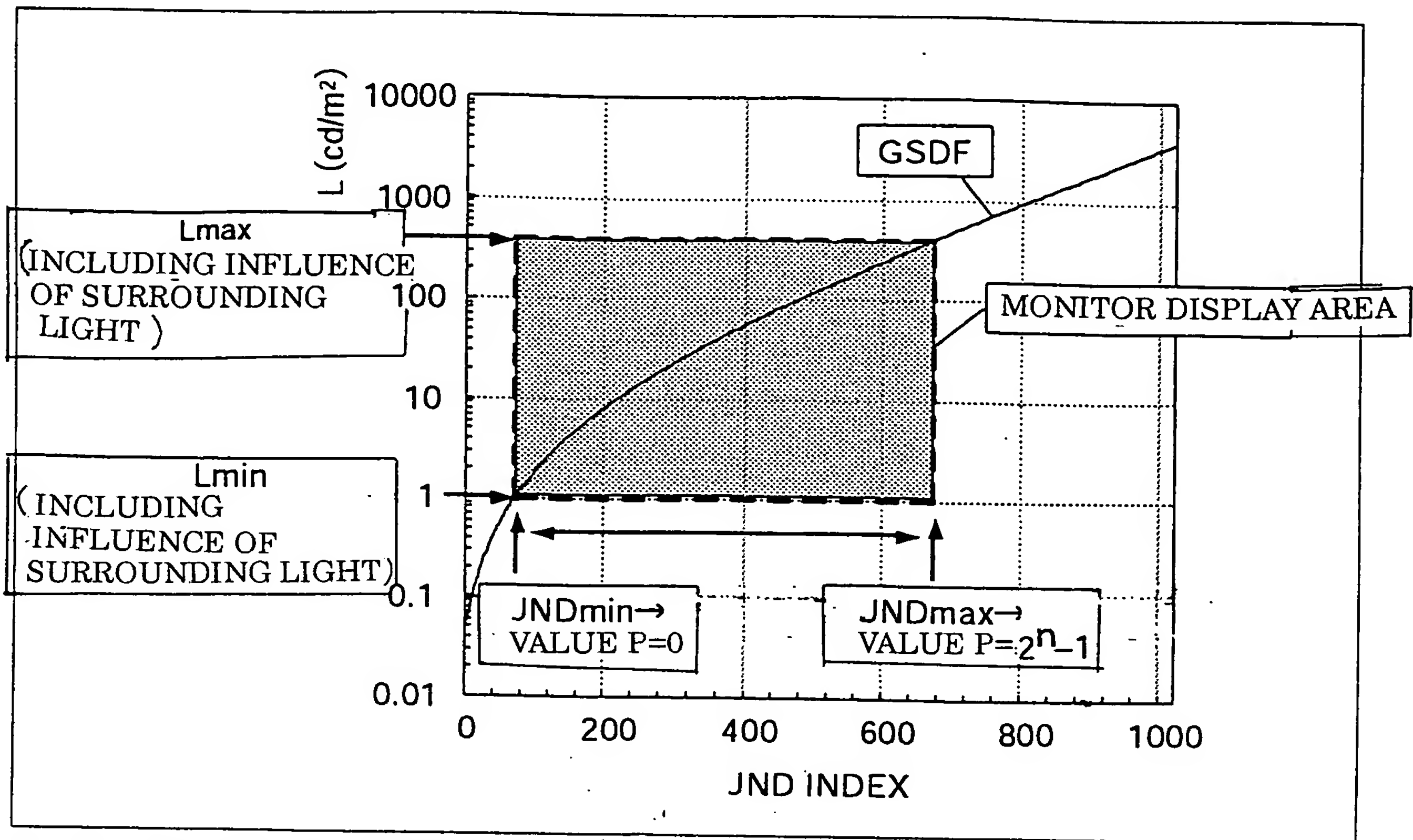


Fig. 4 Application of a GSDF to a Monitor

Table 5 Expression for Calculating GSDF

• JND INDEX → LUMINANCE

$$\log_{10} L(j) = \frac{a + c \cdot \ln(j) + e \cdot (\ln(j))^2 + g \cdot (\ln(j))^3 + m \cdot (\ln(j))^4}{1 + b \cdot \ln(j) + d \cdot (\ln(j))^2 + f \cdot (\ln(j))^3 + h \cdot (\ln(j))^4 + k \cdot (\ln(j))^5} \dots (1)$$

$j = 1 \sim 1023$

$a = -1.3011877$, $b = -2.5840191E-2$, $c = 8.0242636E-2$, $d = -1.0320229E-1$

$e = 1.3646699E-1$, $f = 2.8745620E-2$, $g = -2.5468404E-2$, $h = -3.1978977E-3$

$k = 1.2992634E-4$, $m = 1.3635334E-3$

• LUMINANCE → JND INDEX

$$j(L) = A + B \cdot \log_{10}(L) + C \cdot (\log_{10}(L))^2 + D \cdot (\log_{10}(L))^3 + E \cdot (\log_{10}(L))^4 + F \cdot (\log_{10}(L))^5 + G \cdot (\log_{10}(L))^6 + H \cdot (\log_{10}(L))^7 + I \cdot (\log_{10}(L))^8 \dots (2)$$

$A = 71.498068$, $B = 94.593053$, $C = 41.912053$, $D = 9.8247004$

$E = 0.28175407$, $F = -1.1878455$, $G = -0.18014349$, $H = 0.14710899$

$I = -0.017046845$

誌上講座

画像表示装置(1)



株式会社ナナオ映像商品開発部 橋本憲幸

はじめに

医用画像のデジタル化に伴い、医療施設における画像情報システムが普及段階を迎えつつある。医用画像情報システムの構成要素の一つである画像表示装置は、従来のイメージャ/フィルム/シャウカステンからモニタへ移行する。既に現場では多くのモニタが使われているが、大部分は参照用であり読影はフィルムが主流である。しかし、モダリティの発展により膨大な画像情報から読影を行う必要があり、従来通りのフィルムによる読影での対応は困難であると考えられる。また、画像特性のプリセット・比較読影(過去画像、異なるモダリティ、特性変更)・動画再生などの操作性の向上が期待できる。そして、システムのデジタル化を図り経済的メリット(管理費、フィルム代、保管スペース、共有化など)を出すためにはフィルムレスが必要不可欠である。

フィルムレス実現のためにはさまざまな要件を満たす必要があるが、画像表示装置の性能としてフィルム/シャウカステンと同等以上の表現能力が求められている。また、維持管理の容易さも重要な項目である。現時点の製品ではCRT(cathode ray tube)とLCD(liquid crystal display)モニタが実用化されているが、それぞれの表示デバイスおよび駆動方法には特徴があるため、機器導入や品質維持管理をするにあたり必要な項目が異なる場合が出てくる。本講座では、CRTとLCDモニタの構造からその特徴や使用上の留意点などについて解説する。モニタの基本を理解し、今後の参考にしていきたい。

1. イメージャ/フィルム/シャウカステン

現在、画像の読影の主流はフィルム/シャウカステンである。モニタ診断の移行に際してのモニタの性能評価、観視条件や品質維持規格について言及される機会が増えている。しかし、フィルム/シャウカステンにおける画像表示においても輝度階調特性・輝度均一性・輝度ドリフト・輝度経時変化・観視条件などの特性は同様である。輝度特性は、イメージャの濃度設

定・出力特性、フィルムの特性、シャウカステンの特性に依存している。イメージャ〜フィルム〜シャウカステンで一つのシステムであり、特性評価としてモニタよりも複雑な部分もある。モニタとの比較評価あるいは比較読影においては、上記特性を念頭に入れて行うことが必要である。今後モニタを導入するにあたり、維持管理のため輝度計も必要とされている。シャウカステン/フィルムはこれからも必要であり、モニタだけではなくシャウカステン/フィルムの維持管理も同時に行う必要があると思われる。

1-1 フィルム/シャウカステンの輝度範囲

フィルム/シャウカステンの輝度(L)は、下記の式で表せる。

$$L = La + Lo \cdot 10^{-D}$$

La : フィルムによって反射される周辺室内光

Lo : フィルムが存在しないシャウカステンの輝度

D : フィルム上で得られる光学濃度

例えば、 $La = 1.0 \text{ cd/m}^2$, $Lo = 3,000 \text{ cd/m}^2$, D_{max} (最高濃度) = 3.0, D_{min} (最低濃度) = 0.2とすると、最高輝度(L_{max})と最低輝度(L_{min})は、

$$L_{\text{max}} = 1.0 + 3,000 \cdot 10^{-0.2} \text{ cd/m}^2 = 1,893.9 \text{ cd/m}^2$$

$$L_{\text{min}} = 1.0 + 3,000 \cdot 10^{-3.0} \text{ cd/m}^2 = 4.0 \text{ cd/m}^2$$

となる。最高輝度と最低輝度の中で、フィルムの濃度に準じた輝度特性が得られる。つまり、イメージャで設定されている濃度値対入力値特性から、使用しているフィルムの輝度階調特性を知ることができる。メーカーや機種によって設定値は異なるので確認が必要である。また、環境光とシャウカステンによっても輝度特性が変わるので注意が必要である。

業界標準であるDICOM PS3.14 GSDF(Grayscale Standard Display Function)では、モニタの階調特性だけではなく、フィルムの濃度階調特性にもグレースケ

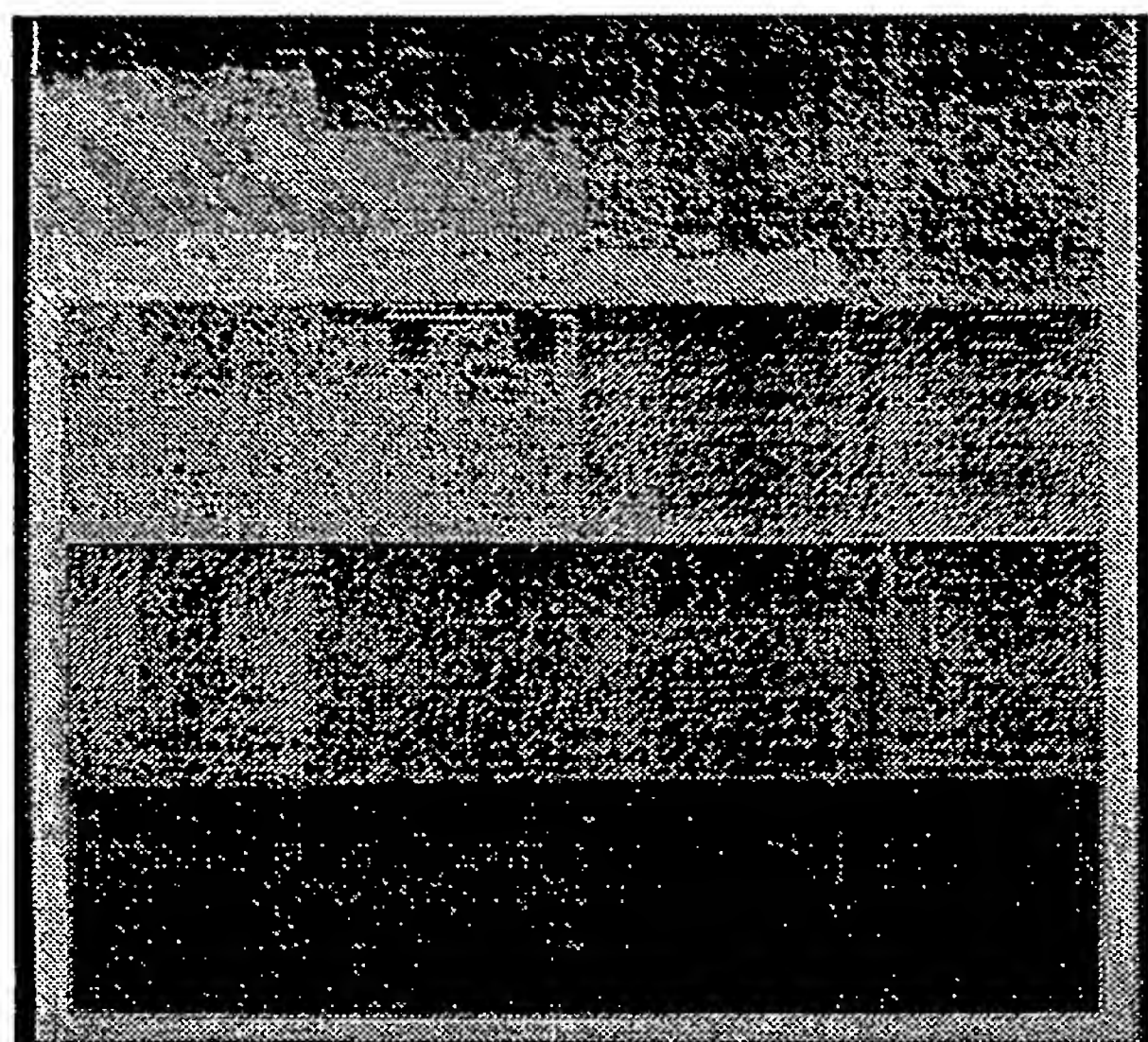


Fig. 1 測定用テスト画像 (写真)

ール標準表示関数(GSDF)の適用を求めている。GSDFの適用は、モニタやイメージャの出力特性をほぼ同等の階調特性で画像を表示・出力することを可能にするものである。この規格に対応したイメージャで出力されたフィルムと、同様に対応したモニタの表示においては、絶対輝度は異なるが画像の見え方はほぼ同一となる。各種モダリティ、イメージャ、モニタが接続されるネットワーク環境では、画像表示の整合性が問われ装置の違いによって診断に影響が出ないような管理が要求される。

1-2 フィルムの輝度ムラ

フィルムの輝度(濃度)ムラについて一例を紹介する。Fig. 1はフィルムにテスト画像を出力させたものである。テスト画像は、80mm×80mmサイズのタイルを4×4に配列し階調を表示し、明るい方(左上)から1, 2, ..., 16と番号を付けている。目視では順序通りの階調に見えるのだが、輝度を測定すると15番目と16番目の輝度の順序が入れ替わっていた。輝度測定はシャウカステンなどの影響を避けるため、シャウカステン上の同じ位置にフィルムを移動し、タイル中央を測定している。タイルの中央では濃度値と輝度値の関係は正しく出ている(Table 1)が、詳細な濃度値を測定(Fig. 2)すると、境界部分では濃度差があるがタイル内で濃度傾斜が発生している。つまり、15番目と16番目のタイルの濃度は同等レベルであるが、目視では階調の切り換わる部分で判断していることになる。この場合、イメージャから出力されたフィルムの濃度ムラ(傾斜)によって輝度の順序が逆になっているのにもかかわらず、目視では順序通りに見えてしまうことが発生す

Table 1 フィルム濃度と輝度

No.	入力値	中央濃度値	計算輝度値 (cd/m ²)	実測輝度値 (cd/m ²)
13	1536	1.11	217.5	208.3
14	1664	1.23	165.2	162.1
15	1792	1.31	137.5	137.3
16	1920	1.30	140.7	142.4

$$L_0 = 2,793 \text{ cd/m}^2$$

$$L_a = 0.73 \text{ cd/m}^2$$

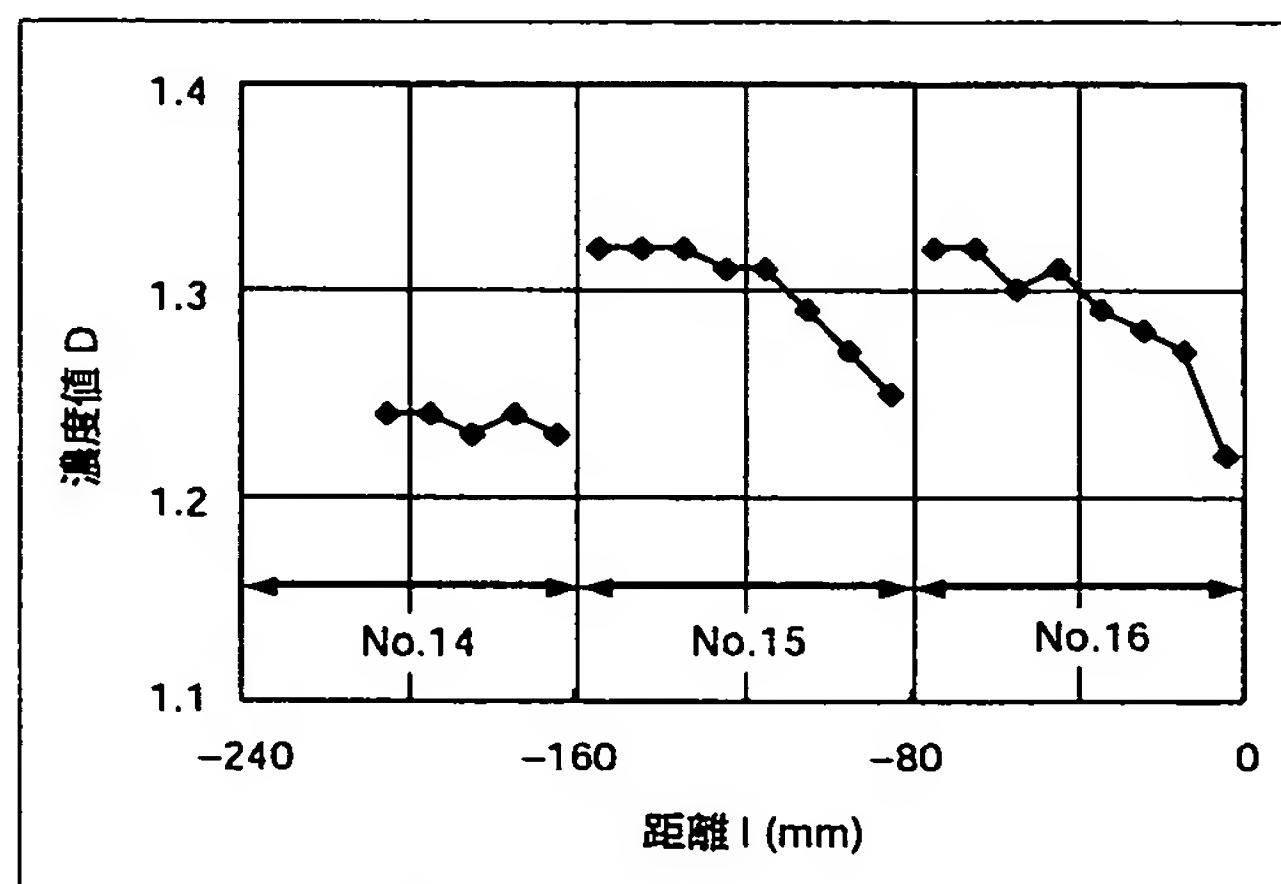


Fig. 2 フィルム濃度の測定値

る。臨床画像ではこのような様なパターンはないが、使用しているイメージャやモニタを比較する場合の参考にはなると考える。

1-3 シャウカステンの輝度特性

シャウカステンの性能は、JIS Z 4918:1995(医用X線写真観察器)によって規定されている。その中で輝度に関する項目は三つある。

(1) 観察面の輝度

3,000cd/m²以上(観察面中央, 固定形)

(2) 観察面の光の拡散性

$$S = (L_{20} + L_{45}) / (2 \cdot L_5) \geq 0.9$$

L_5 : 観察面と5°以内の垂直方向での輝度

L_{20}, L_{45} : 観察面と20°(45°)の傾きを持つ方向での輝度

(3) 観察面の輝度の均一性

$$T = L_{min} / L_{max} \geq 0.5$$

L_{min} : 測定した輝度の最小値を含む下位4番目までの平均値

L_{max} : 測定した輝度の最大値を含む上位4番目までの平均値

輝度は、観察面中央から35mm×35mmに分割し、観察面内で正方形が得られる部分の中央を測定する。

Table 2 シャウカステンの輝度均一性
センター位置の輝度に対する比率

	y方向距離 (mm)	x方向距離 (mm)				
		-140.0	-70.0	0.0	70.0	140.0
	175.0	0.65	0.65	0.65	0.63	0.61
	87.5	0.90	0.92	0.93	0.92	0.91
	0.0	1.00	1.01	1.00	1.00	1.00
	-87.5	0.95	0.95	0.94	0.94	0.93
	-175.0	0.75	0.74	0.73	0.73	0.69

輝度(センター)=2,873cd/m²

シャウカステンは複数の蛍光灯を配置し反射板と拡散面によって、輝度と均一性を確保している。しかし、蛍光灯の端は暗くなるため、縦に配列されている場合はTable 2のように上下方向の輝度変化が大きくなる。規格における評価値Tが0.5というのは、輝度が半分となることを意味しており、かなり変化が大きいといえる。これ以外には、電源オン時からの輝度ドリフトがあり安定するまでには120分ほどかかるようである(Fig. 3)。長期的に見るとゆっくりと輝度は低下していく。蛍光灯では、明るさが初期の約70%に減少する時間あるいは点灯しなくなるまでの時間を寿命とするが、一般的に6,000～7,500時間が定格寿命である。使用条件(ON/OFF頻度、周囲環境温度)によって寿命は異なるが、定期的な確認が必要である。

2. モニタ

5年程前まではモニタといえばCRTを指すことが一般的であったが、最近はさまざまなデバイスが使用されてきている。さらに新しいデバイスの研究・開発も盛んで性能改善が著しく、5年後はどのようなになっているか予想するのが難しい状況である。

2-1 CRTモニタ

CRTはTV用途において発展してきたが、コンピュータの端末ディスプレイとして高解像度化が進められてきた。一般用途として急速に発展したのは、1981年のIBM-PCの発表からである。その時のグラフィックスであるCGAは、解像度：320×200、色数：4色というレベルであった。1987年頃にはVGAやWindowsが開発され、高解像度化への要求がさらに高まった。モニタの開発の目標はいかに高解像度に対応しているかであり、CRTや半導体の開発が急速に進むこととなった。その後はフラット化・高輝度化の開発に移る一方で、価格は急激に下がってきた。現在ではLCDの伸びが著しいが、一般用途においてCRTはコストパフォーマンスの優れた表示デバイスであり、テレビ用途を除いても年間約1億本生産されている。モノクロCRTは、ワ

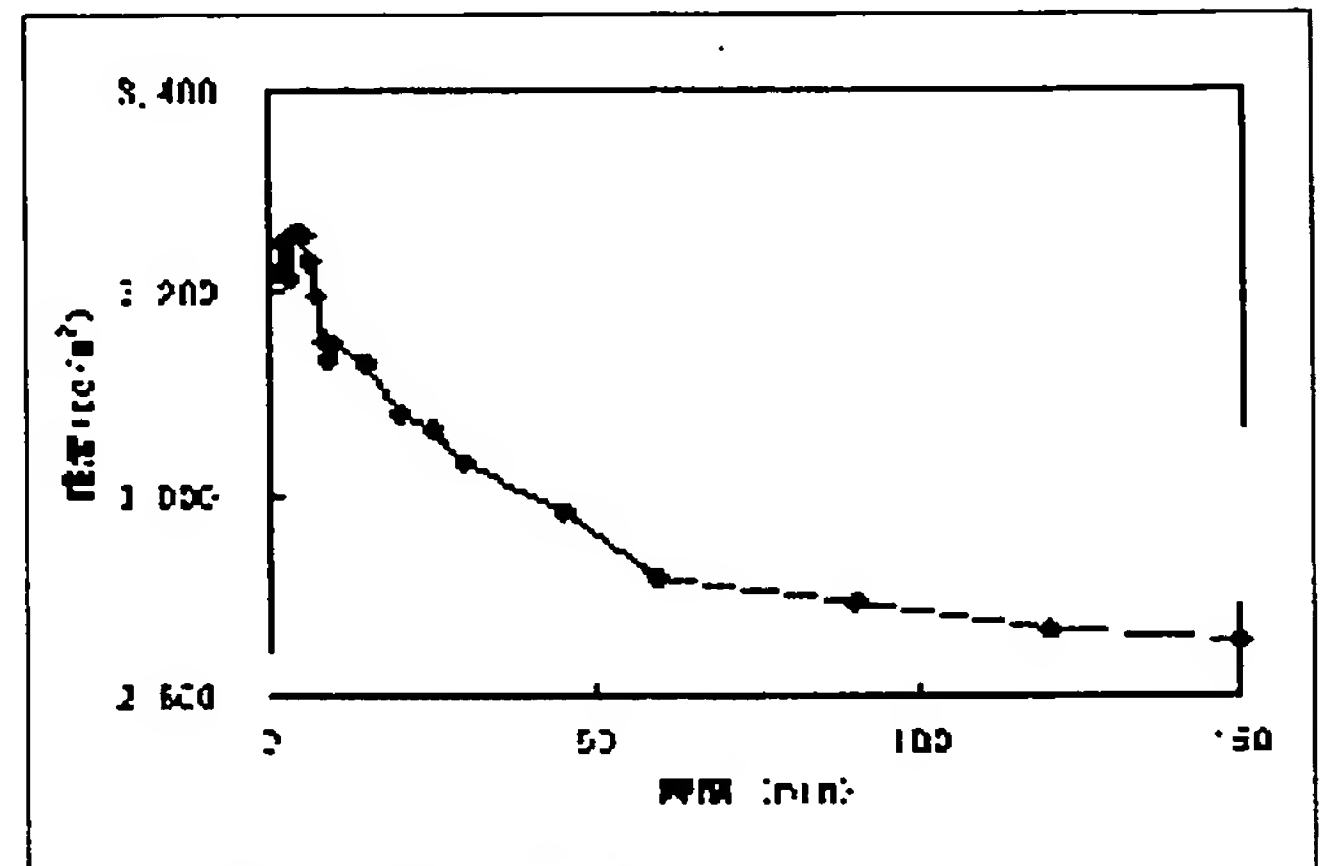


Fig. 3 シャウカステンの輝度ドリフト

ープロ用として高解像度表示ではカラーCRTより進んではいたが、一般用途からは外れていった。現在では、医療用途などの特定分野でしか見ることはできない。Table 3に、CRTモニタの長所・短所を列記する。

2-2 LCDモニタ

LCDのモニタへの応用は1963年の電気光学効果の研究から始まる。以来、CRTの性能に到達することを目指しに驚異的發展を続け、現在ではあらゆる分野で使われるようになった。2000年以降市場価格が急激に下がり、シェアを大幅に伸ばしている。大型LCDパネルの生産量は、ノートPC用を除くと年間約1,000万台になりさらに伸びる状況である。2000年には、医療用モノクロLCDモニタ(1,536×2,048表示)が開発され、高輝度・高解像度・歪み・フォーカス・省スペース・経済性などのメリットからモニタ診断への期待が高まっている。また、PACS(医用画像情報システム)だけではなく、RIS(放射線情報システム)・HIS(病院情報システム)においても汎用LCDモニタの採用が増えている。

現在主流のPC用カラーLCDや医療用モノクロLCDは、アクティブマトリクス駆動のTFT(Thin Film Transistor)方式であり、背面にバックライトを付設し

Table 3 CRTの一般的特徴

長所	短所
視野角が広い	幾何学歪みがある
いろいろな解像度の表示ができる	フォーカス
自己発光で発色に優れている	地磁気の影響を受ける
コントラストが高い	ミスコンバージェンス(色ずれ)
黒浮きがない	高圧回路が必要(約27kV)
階調表示は無限大	大電流回路が必要(約15App)
表示が滑らかである	平面化が難しい
色温度の設定が簡単	調整項目が多い
応答速度が速く動画再生に優れる	消費電力大
安価	重い・奥行きが長い

Table 4 LCDの一般的特徴

長所	短所
歪みがない	黒が浮く
サイズ・解像度の自由度が高い	多階調化が難しい
高精細が可能	視野角が狭い
300dpiも可能	階調反転・色度変位
平面表示	動画対応が難しい
ディジタル化が比較的容易	応答速度・駆動方式
ちらつきにくい	残像現象が発生
低消費電力	固定解像度
CRT比約50%	パネル解像度以外はボケる
小型・軽量・薄い	蛍光管(水銀の使用)

た透過型LCDである。CRTでは、カラー用とモノクロ用ではシャドウマスクの有無という大きな差があるが、LCDの場合カラー用とモノクロ用の構造に大きな違いはない。Table 4に、LCDモニタの長所・短所を列記する。

2-3 その他のモニタ

CRTやLCDの次に期待される表示デバイスで最も有力なのは、有機EL(Organic Electro Luminescence)である。有機化合物を発光材料とする有機ELは、LCDに比べ視野角が広く、コントラストが良く、応答速度も速く、視認性に優れている。また、バックライトが不要なため、薄型・軽量化が実現でき消費電力面でも有利である。直流低電圧駆動で応答速度も速い。すでに実用化が始まっているが、課題として高精細化・発光効率向上・大型化・フルカラー化などがあり、モニタ用途としてはもう少しばかり待つ必要がある。その他に、PDP(Plasma Display Panel)・FED(Field Emission Display)などさまざまなデバイスが研究・開発されている。

2-4 モニタにおける諸特性

モニタの性能を評価する項目はたくさんあるが、その中で画像表示に関する要素を掲げる。デバイスによっては無視できる場合もある。

- ・幾何学精度…歪み・直線性・サイズ・解像度・精細度
- ・環境影響…表面処理・反射
- ・輝度応答…輝度範囲・階調特性・視野角・応答時間
- ・空間解像度…フォーカス・周波数特性・ベ어링
グレア
- ・輝度均一性・色度均一性
- ・品位…ジッタ・リングング・スミア・フリッカ・
ムラ・クロストーク・残像・欠点・モアレ・コ
ンバージェンス など
- ・経時変化・寿命・環境温度

- ・色再現性…表示色数・色再現域・色度変移・入力信
号・調整機能・キャリブレーション

表示とは関係ないが、機器導入にあたっては価格・重量・大きさ・消費電力・安全性・適合規格などの確認がある。その中で気をつける項目としては、消費電力である。消費電力が同じであっても入力電流が異なる場合があり、電源の効率により入力電流に差が出てくる。また、電源オフ時にも電流が流れているので、多数導入する場合は注意する必要がある。

3. 医用画像表示装置のグレースケール表示

医用画像表示用モニタにおいては、DICOM PS3.14の適用が標準として必要とされている。周囲光の影響も加味されており、適用する場合はそれぞれの設置環境に合わせて対応する必要がある。

3-1 DICOM PS3.14 GSDF

DICOM PS3.14は1-1項で述べたように画像データの表示の整合性をとるために、GSDFを規定し1998年に発行された。与えられた観察条件のもとで、平均的人間観察者が最小識別可能である与えられたターゲットの輝度の差を1JND(Just-Noticeable Difference, 弁別域)と定義する。最小輝度を0.05cd/m²として1023ステップまでのJNDをプロットしたのが、GSDFである(Fig. 4)。JND INDEXが表示装置に対する入力値となる。また、機器に組み込むために数式が与えられている。(Table 5)

この関数を使うと、画像表示装置の最小輝度と最大輝度からJNDが計算でき、人間の判別できる階調のステップ数が分かる。この時の輝度には周囲光の影響も含まれるので注意する。例えば1-1項のフィルム/シャウカステンで計算された輝度はTable 5(2)式より、

$$JND = JND_{max} - JND_{min} = j(L_{max}) - j(L_{min}) \\ = j(1893.9) - j(4.0) = 908.2 - 145.7$$

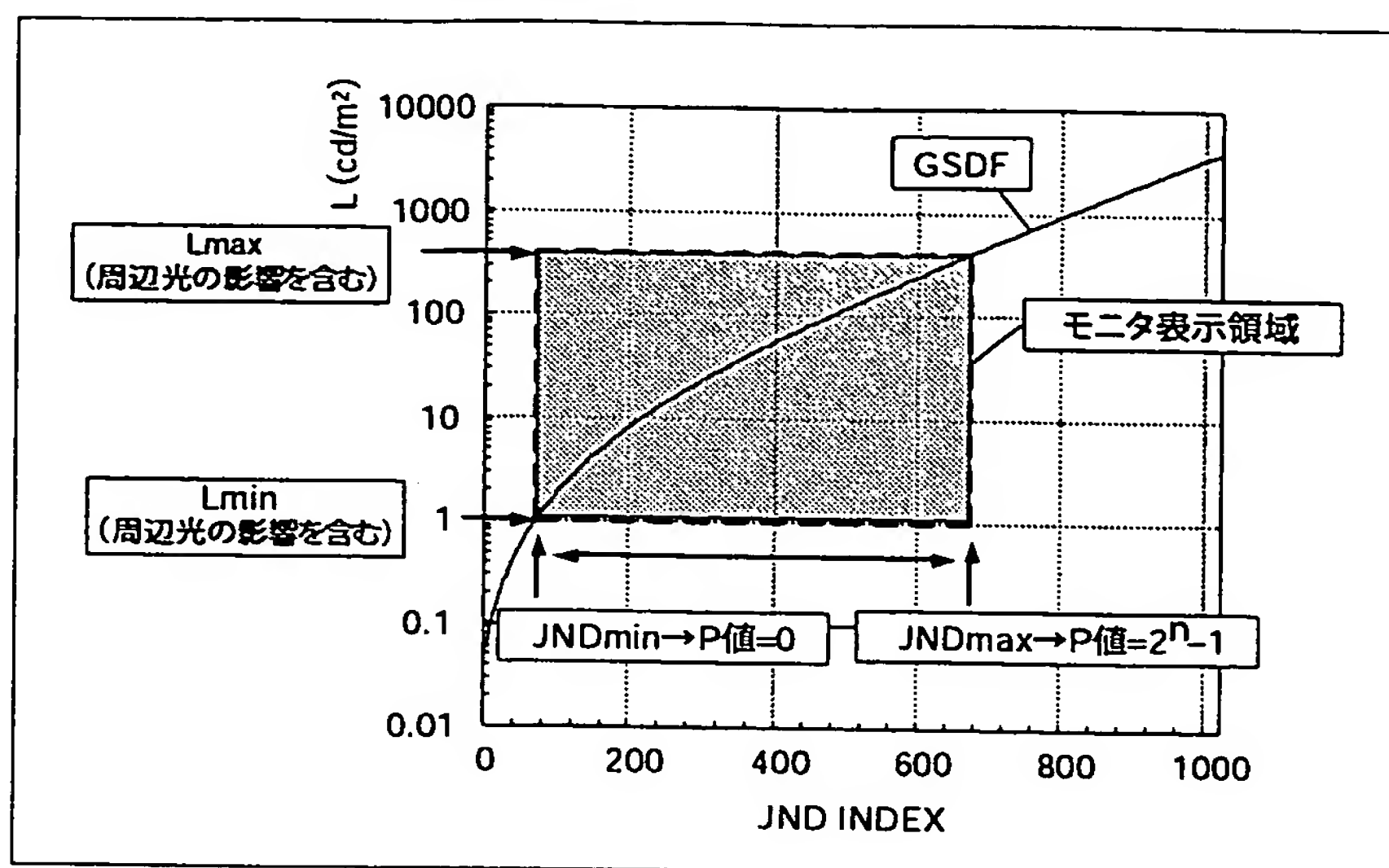


Fig. 4 GSDF とモニタへの適用

=762.5

となる。モニタを想定し、 $L_{min}=1.0\text{cd/m}^2$ 、 $L_{max}=400\text{cd/m}^2$ とすると、

$$JND=672.8-71.5=601.3$$

となる。上記条件においては、フィルム/シャウカステンでは762階調、モニタでは601階調の識別が理論上可能な輝度値であることを示している。

3-2 モニタへの適用

GSDFをモニタに適用する場合の手順を示す。

(1)周囲光の影響を考慮して、

L_{min} 、 L_{max} を決定する。

(2) L_{min} 、 L_{max} から、 JND_{min} と JND_{max} を Table 5(2) 式より算出する。

(3)デジタル入力信号の解像度(n bit)に対し各入力レベルをP値とし、JNDを 2^n-1 に等分して割りあてる。各P値に対する輝度LはTable 5(1)式より、 $L=L(JND_{min}+JND \times P/(2^n-1))$ 、 $JND=JND_{max}-JND_{min}$ となる。

例えば、3-1項のモニタにおいて入力が8bitとすると、 $L=L(71.5+601.3 \times P/255)$

$$=L(71.5+2.358 \times P), P=0, 1, \dots, 255$$

となる。輝度は 1cd/m^2 から 400cd/m^2 の範囲で2.358JNDステップで与えられる(Fig. 4)。ちなみに、フィルムの場合はさらに濃度値に変換する必要がある。

Fig. 5は、参考として $L_{min}=1.0\text{cd/m}^2$ 、 $L_{max}=400\text{cd/m}^2$ としたときの各種階調特性を比較している。基本的

Table 5 GSDF 算出式

・ JND INDEX → 輝度

$$\log_{10} L(j) = \frac{a+c \cdot \ln(j)+e \cdot (\ln(j))^2+g \cdot (\ln(j))^3+m \cdot (\ln(j))^4}{1+b \cdot \ln(j)+d \cdot (\ln(j))^2+f \cdot (\ln(j))^3+h \cdot (\ln(j))^4+k \cdot (\ln(j))^5} \dots (1)$$

$j=1 \sim 1023$

$$a=-1.3011877, b=-2.5840191\text{E}-2, c=8.0242636\text{E}-2, d=-1.0320229\text{E}-1$$

$$e=1.3646699\text{E}-1, f=2.8745620\text{E}-2, g=-2.5468404\text{E}-2, h=-3.1978977\text{E}-3$$

$$k=1.2992634\text{E}-4, m=1.3635334\text{E}-3$$

・ 輝度 → JND INDEX

$$j(L)=A+B \cdot \log_{10}(L)+C \cdot (\log_{10}(L))^2+D \cdot (\log_{10}(L))^3+E \cdot (\log_{10}(L))^4+F \cdot (\log_{10}(L))^5+G \cdot (\log_{10}(L))^6+H \cdot (\log_{10}(L))^7+I \cdot (\log_{10}(L))^8 \dots (2)$$

$$A=71.498068, B=94.593053, C=41.912053, D=9.8247004$$

$$E=0.28175407, F=-1.1878455, G=-0.18014349, H=0.14710899$$

$$I=-0.017046845$$

に $\gamma=2.2$ はCRT、Loglinearはフィルムの特性である。LCDも通常は $\gamma=2.2$ の特性が出るように設定されている。

3-3 評価

DICOM PS 3.14では輝度階調特性を定義しているが、許容差は示していない。臨床診療における評価において許容度の定義を決定することが必要としている。ただし、評価する方法については例として記載しているので簡単に説明する。

3-2項において、輝度は等間隔のJNDにて決定していくとした。評価の場合は、逆に各入力値に対する輝度を測定し、各輝度間のJNDステップ数を求め、いかに等間隔になっているかを検証する。

(1)各入力値の輝度を測定する。

測定領域：ディスプレイの中心に置かれた表示

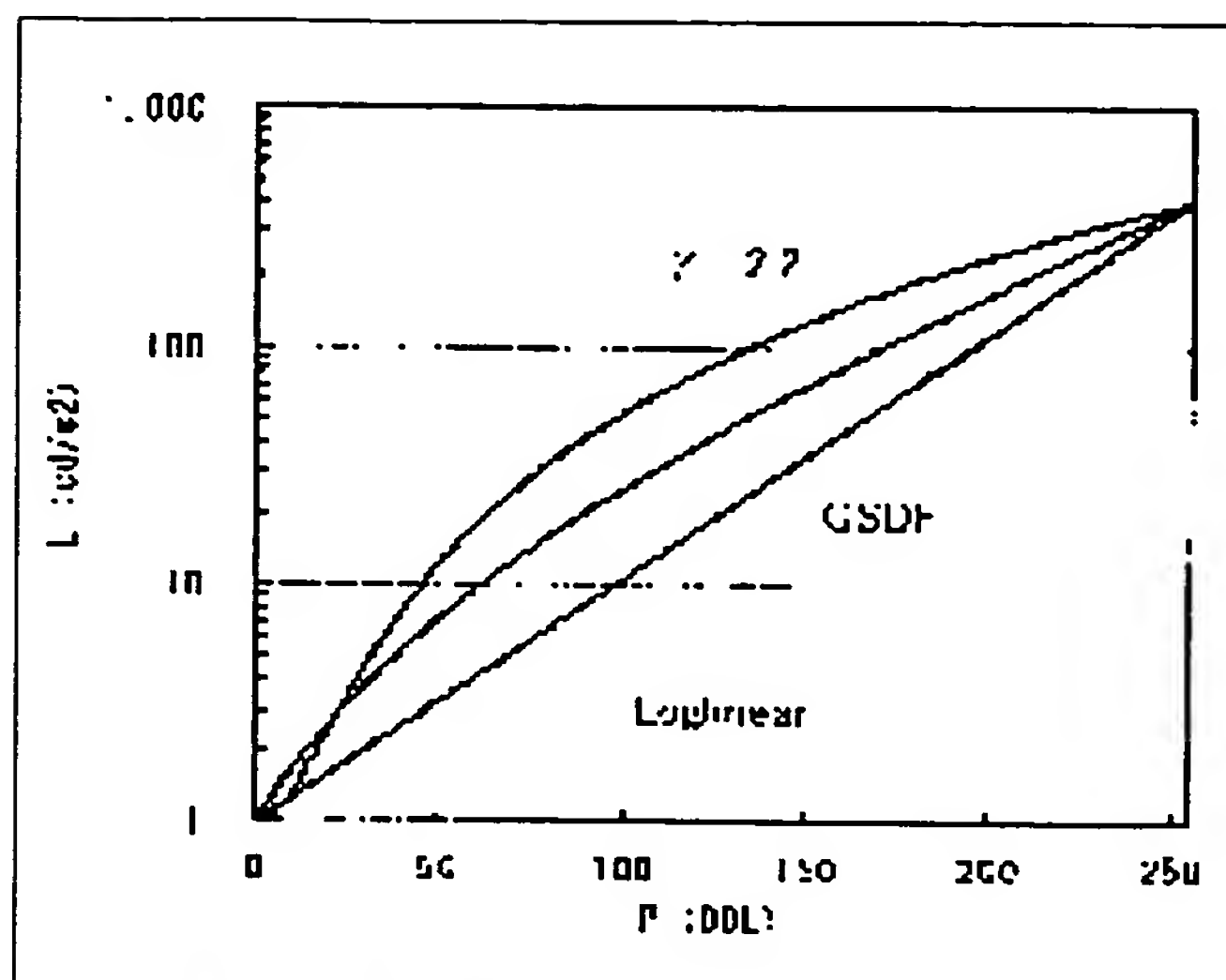


Fig. 5 階調特性の比較

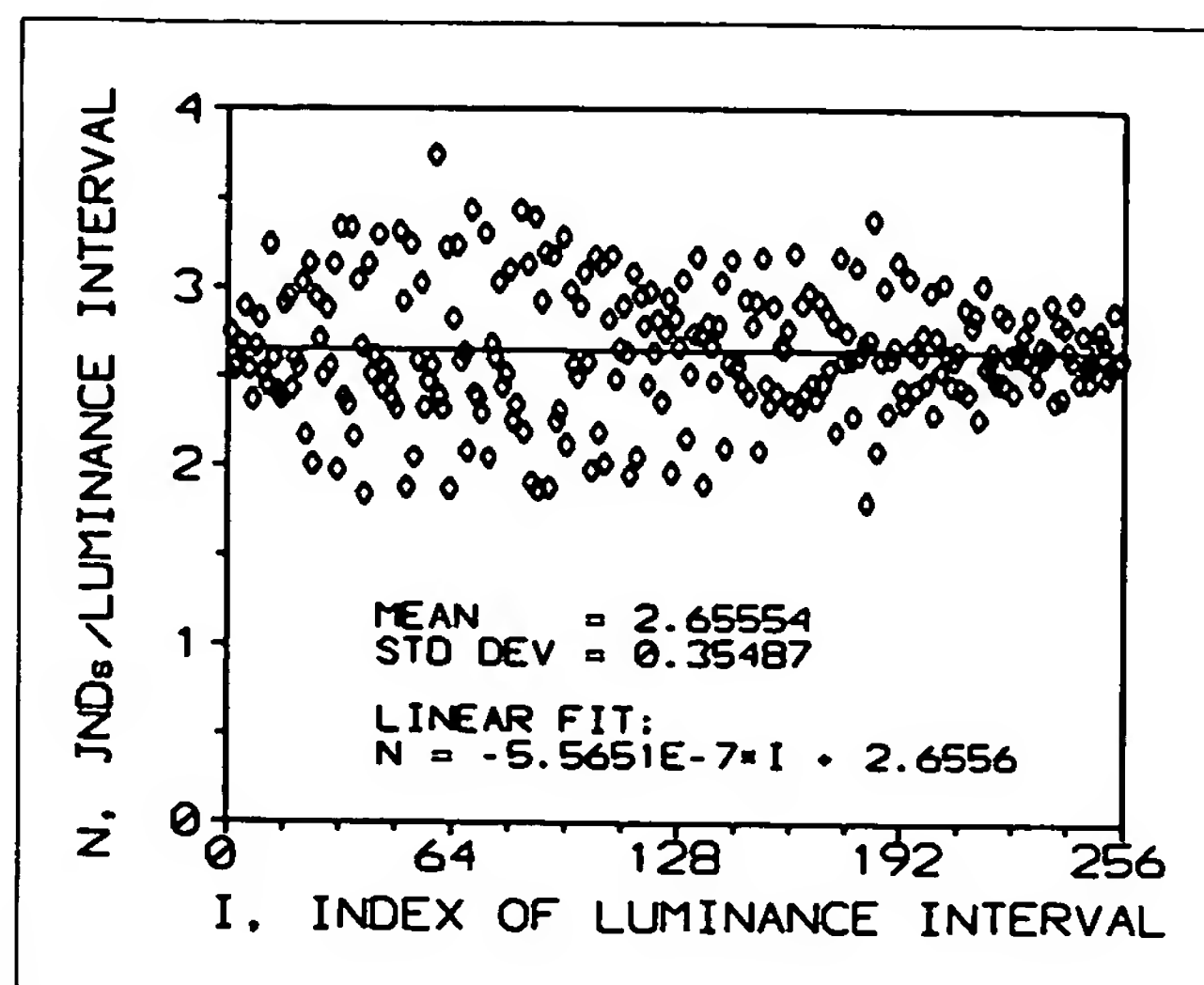


Fig. 6 GSDの評価例 (DICOM PS 3.14 からの抜粋)

画素の総数の10%を含む正方形

バックグラウンド：最高輝度の20%の均一画面

- (2) 輝度測定値から各輝度間のJNDステップ数を計算する。
- (3) 輝度間隔当たりのJNDステップ数をプロットする。
- (4) 回帰直線を求める。
- (5) 平均値と標準偏差を求める。

結果例としてFig. 6のようになる。どの程度の精度でモニタに出力されているか知ることができる。医用画像表示装置の品質維持規格AAPM TG-18では、GSDの適用および許容差について記載されており、

今後必要とされている。

4. おわりに

モニタ診断への移行に際し、品質維持管理について話題になる機会が増えている。画像表示装置としてフィルム/シャウカステンの品質維持についても考慮する必要があると思い、モニタの説明をする前にフィルム/シャウカステンの説明を入れた。輝度計を購入されたときは、モニタだけではなくフィルム/シャウカステンの輝度特性も見ていただきたい。

次回は、「画像表示装置(2)－CRTモニター」